

考虑自由弛豫的油纸绝缘拓扑分析及状态评估*

陈汉城, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108)

摘要:提出一种考虑自由弛豫过程的变压器绝缘拓扑分析方法,该方法基于回复电压谱线的弛豫参数信息,从微观动力学出发,引入自由弛豫因子 β_i ,从而获得包含不同介电弛豫响应信息的分支谱线,并确定变压器油纸绝缘弛豫拓扑结构。同时,对30多台变压器油纸绝缘弛豫参数与状态评估的关系进行研究,结果表明:弛豫机构数 N 、平均时间常数 $\bar{\tau}$ 和自由弛豫因子 β_i 均能反映油纸绝缘状态信息。随着变压器油纸绝缘老化程度加深,弛豫机构数 N 和自由弛豫因子 β_i 增大,与之相反,平均时间常数 $\bar{\tau}$ 减小。此外,自由弛豫因子 β_i 在绝缘油劣化和绝缘纸老化的两种状态中具有不同的数值范围,可为变压器油纸绝缘老化评估提供新的思路。

关键词:拓扑分析;弛豫机构数;平均时间常数;自由弛豫因子

中图分类号: TM411 TH183 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Topology analysis and evaluation of oil-paper considering free relaxation

Chen Hancheng, Cai Jinding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A topology analysis method of transformer insulation is proposed, which considers free relaxation process. This method introduces free relaxation factor β_i from microscopic dynamics, based on the return voltage line relaxation parameter information. The branch lines of different dielectric relaxation response information is obtained, and the topological structure of transformer insulation is determined. At the same time, the relationship between more than 30 sets of transformer insulation relaxation parameters and condition assessment are studied. The results show that number of relaxation mechanism number N , average time constant $\bar{\tau}$ and free relaxation factor β_i can reflect insulation status. As the aging degree of transformer oil-paper insulation increasing, the number of relaxation mechanism N and the free relaxation factor β_i are increasing, on the contrary, the average time constant $\bar{\tau}$ is decreasing. In addition, free relaxation factor has a different scale in the deterioration of oil and paper, which can provide a new idea for transformer insulation aging evaluation.

Keywords: topological analysis; relaxation mechanism number; average time constant; free relaxation factor

0 引言

变压器的正常稳定运行对电网具有十分重要的意义^[1-2],准确评估变压器中油纸绝缘老化状态显得至关重要。基于弛豫响应的拓扑结构分析^[3-6]是评估变压器油纸绝缘状态的有效途径之一。

目前通过弛豫响应的数学模型分析提取特征量评估油纸绝缘状态已有一定研究,但油纸绝缘弛豫建模^[7],尤其是对扩展 Debye 模型的拓扑分析仍然是当前研究的一个难点。1)当前的弛豫响应函数不能准确反映油纸绝缘

的实际弛豫过程,如文献[6,8-9]在拓扑分析中假设偶极子松弛介质之间不会相互影响,虽简化了方程的计算但不够全面;2)由于弛豫机理目前尚未研究透彻,不少学者在弛豫机构数的确定方面,采用任意假定的方式,虽然也可以得到相应的参数辨识结果,但不能真实反映油纸绝缘设备的老化状态及绝缘内部的实际弛豫情况,如文献[10]在对变压器油纸绝缘弛豫拓扑结构分析时,都采用6条弛豫支路,最后仿真极化谱与实际测量数据的吻合度不高,影响后续老化诊断的准确性;3)目前大部分用于评估油纸绝缘状态的弛豫响应特征量仅停留在定性分析,如文献[11-13]分别采用扩展 Debye 模型的大时间常数、几

何参数等特征量分析油纸绝缘状态,但未涉及定量评估方法且无法分别有效地评估绝缘油与绝缘纸的老化状态。

为了提高油纸绝缘状态评估的准确性,必须进一步研究和改进当前的弛豫响应函数模型。大量的热释电数据表明^[14],介质弛豫的实际过程并不是简单的单一指数衰减形式的叠加。李景德等人^[14]通过对极间为固体电介质的同一电容器进行充放电实验,结果表明:在放电过程中,电介质中的电场很小,可观察到吸收电流在释放过程中的自由弛豫遵从方均根指数的衰减规律。

因此,本文提出一种考虑自由弛豫过程的变压器绝缘拓扑分析方法,引入自由弛豫因子 β_i ,深入挖掘回复电压函数的拓扑信息,得到各条包含不同弛豫响应参量的子谱线,从而更准确地分析绝缘拓扑结构。该模型不仅能更准确辨识油纸绝缘拓扑结构,且更符合实际弛豫响应机理,体现弛豫过程的物理含义。研究表明,该方法在变压器绝缘拓扑建模上准确度有一定的提高,同时为后续提取新特征量分别对绝缘油与绝缘纸进行状态评估奠定基础。

1 油纸绝缘弛豫响应分析

1.1 改进的弛豫响应函数

目前在变压器弛豫机构的拓扑分析中,通常采用式(1)的传统弛豫响应函数来反映变压器油纸绝缘的弛豫过程。

$$f(t) = \sum_{i=1}^n B_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

式中: n 表示弛豫响应项数, B_i 表示第 i 个弛豫机构对整体作用所占比重。

该弛豫响应函数是在偶极子松弛介质之间不会产生相互作用的条件下提出的。但在实际极化过程中,不同的弛豫条件下显示出不同的弛豫过程。弛豫过程通常可分为两种,分别是自由弛豫和随机弛豫^[14]。在外加电场的作用下的弛豫过程称为随机弛豫,其弛豫响应遵循 $\exp(-t/\tau_i)$ 的指数响应函数,如式(1)所示。在自由状态下的弛豫过程称为自由弛豫,其弛豫响应遵循 $\exp(-t/\tau_i)^{1/2}$ 的方均根指数衰减规律。在实际的变压器油纸绝缘极化过程中,偶极子的弛豫扩散过程受到制约,衰减规律应该既包含一部分随机弛豫过程,同时也有一部分自由弛豫过程,故其衰减速度应该处于指数衰减与方均根指数衰减之间。

因此,为了更准确描述变压器油纸绝缘弛豫过程,引入自由弛豫因子 β_i ,此时弛豫响应函数如式(2)所示。

$$f(t) = \sum_{i=1}^n B_i e^{-(t/\tau_i)^{\beta_i}} \quad (2)$$

式中: β_i 定义为第 i 条弛豫支路的自由弛豫因子。可看出当 β_i 都等于1时,即只考虑随机弛豫过程的传统弛豫

响应函数。

在热释电的大量实验中已经得到结论: $\beta_i = 1$ 和 $\beta_i = 1/2$ 分别代表随机弛豫和自由弛豫的两个典型值。自由弛豫过程情况复杂,当弛豫过程不受扩散作用制约,即只考虑随机弛豫过程,各条弛豫支路的自由弛豫因子都有 $\beta_i = 1$;当弛豫响应受部分扩散作用制约时,各条弛豫支路的自由弛豫因子取值范围是 $1/2 \leq \beta_i \leq 1$;当扩散作用完全制约时,各条弛豫支路的自由弛豫因子都有 $\beta_i = 1/2$ 。

在变压器的油纸绝缘系统中,绝缘油呈弱极性,而绝缘纸是极性介质,二者在建立弛豫响应过程中所用的时间差距较大,可以明显地反馈在自由弛豫因子 β_i 上。随着变压器运行年限增加,绝缘油与绝缘纸出现不同程度劣化,内部结构随着劣化程度不同而改变,老化产物会增加转向弛豫的强度,加速介电弛豫响应的完成^[4,5,8]。自由弛豫因子 β_i 表征绝缘纸和绝缘油的弛豫速率,故通过分析不同弛豫时间常数上的自由弛豫因子 β_i 的范围能有效分析此两种介质的老化状态。

1.2 回复电压函数的弛豫信息

目前,回复电压法是变压器油纸绝缘拓扑分析的有效方法之一^[5,8,10],其中回复电压谱线包含有扩展 Debye 模型拓扑建模信息^[11-12]。变压器油纸绝缘系统的扩展 Debye 模型如图1所示。

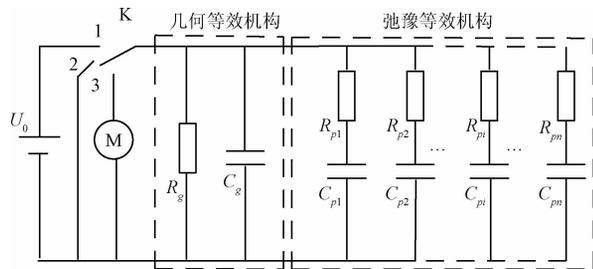


图1 扩展 Debye 模型

Fig. 1 Extended Debye model diagram

在不考虑自由弛豫过程时,假设弛豫等效电路包含着 N 条弛豫 RC 串联支路,分析单条支路的弛豫电容 C_{p_i} 的剩余电压 U_{cpi} 单独作用的结果,建立剩余电压 U_{cpi} 与回复电压 U_{ri} 的函数式^[8]:

$$\frac{U_{ri}(s)}{U_{cpi}(s)} = \frac{H_{N,i}(s - z_{N,i})(s - z_{N-1,i}) \cdots (s - z_{1,i})}{L_{N+1}(s - p_{N+1})(s - p_N) \cdots (s - p_1)} \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$ 。 $H_{N,i}$ 、 L_{N+1} 、 $z_{j,i}$ 和 p_j 代表弛豫等效电路的拓扑信息函数。

现考虑自由弛豫过程的影响,介质弛豫过程并不是单一指数衰减形式的叠加。引入自由弛豫因子 β_i ,并对式(3)进行拉氏反变换,可得在单条极化支路极化电容 C_{p_i} 的剩余电压 U_{cpi} 与回复电压 U_{ri} 时域关系式:

$$U_{ri}(t) = (B_{1,i}e^{-(t/\tau_1)^{\beta_1}} + B_{2,i}e^{-(t/\tau_2)^{\beta_2}} + \dots + B_{N+1,i}e^{-(t/\tau_{N+1})^{\beta_{N+1}}}) \cdot U_{cpi} \quad (4)$$

式(4)中的各指数项前面的系数为:

$$B_{j,i} = \frac{H_{N,i} \prod_{k=1}^N (p_j - z_{k,i})}{L_{N+1} p_j \prod_{l \neq j} (p_j - p_l)} \quad (5)$$

式中: $j, l = 1, 2, \dots, N+1$; $k, i = 1, 2, \dots, N$ 。根据电路叠加定理,所有的 U_{cpi} 共同作用,等效电路的回复电压表达式为:

$$U_r(t) = C_1 e^{-(t/\tau_1)^{\beta_1}} + C_2 e^{-(t/\tau_2)^{\beta_2}} + \dots + C_{N+1} e^{-(t/\tau_{N+1})^{\beta_{N+1}}} \quad (6)$$

式中: $C_j = \sum_{i=1}^N B_{j,i} U_{cpi}$ 。由此可见,回复电压函数表达式如式(6)所示,包含有 $N+1$ 个弛豫信息。在考虑自由弛豫过程时,回复电压函数是由带自由弛豫因子 β_i 的衰减指数形式叠加而成。只要能得到回复电压函数中 $N+1$ 的参数信息,就能知道弛豫响应具有 N 个拓扑机构。

2 变压器油纸绝缘拓扑结构分析

2.1 子函数谱线特性分析

为了进一步研究回复电压表达式的项数信息,将考虑自由弛豫过程的回复电压函数式(6)进行微分,同时乘以时间 t ,获得考虑自由弛豫过程的回复电压时域微分谱线表达式 $L(t, 1/\tau_j, C_j)$ 。

$$L\left(t, \frac{1}{\tau_j}, C_j\right) = -t \frac{du_r}{dt} = \sum_{j=1}^{N+1} C_j \left(\frac{t}{\tau_j}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_j}\right) = \sum_{j=1}^{N+1} C_j \theta_j\left(\frac{1}{\tau_j}, t\right) \quad (7)$$

式中: $\theta_j(1/\tau_j, t) = (t/\tau_j) \exp(-t/\tau_j)$, $j = 1, 2, \dots, N+1$ 。将其定义为第 j 条子谱线函数。研究 $\theta_j(1/\tau_j, t)$ 函数特性可知:1)子函数是一个具有单一峰值的函数,在时间 t 达到峰值点后谱线两侧逐渐衰减,最后趋近于0;2)子函数的各个峰值点的时间常数 τ_j 不相同, τ_j 在数值上越大,对应的峰值点时间 t_j 就越大,该子函数衰减就越慢;3)时间常数 τ_j 越小的子谱线对 $L(t, 1/\tau_j, C_j)$ 谱线的末端贡献就越小, $L(t, 1/\tau_j, C_j)$ 谱线的末端可以看成是大时间常数子函数贡献的结果。

2.2 拓扑结构辨识步骤

为了研究变压器油纸绝缘弛豫参数的拓扑信息,运用数学解析法,将函数逐一分解成各个子函数谱线,具体步骤如下。

1)从微分谱线 $L(t, 1/\tau_j, C_j)$ 的末端开始,任意取3点 t_1, t_2 和 t_3 ($t_3 > t_2 > t_1$),建立下列方程组:

$$\begin{cases} t_1 \frac{du_r}{dt} \Big|_{t=t_1} + C_j \beta_j (t_1/\tau_j)^{\beta_j} \exp(-t_1/\tau_j)^{\beta_j} = 0 \\ t_2 \frac{du_r}{dt} \Big|_{t=t_2} + C_j \beta_j (t_2/\tau_j)^{\beta_j} \exp(-t_2/\tau_j)^{\beta_j} = 0 \\ t_3 \frac{du_r}{dt} \Big|_{t=t_3} + C_j \beta_j (t_3/\tau_j)^{\beta_j} \exp(-t_3/\tau_j)^{\beta_j} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)求出 C_j, τ_j 和 β_j ,然后将计算结果代入 $L(t, 1/\tau_j, C_j)$,即可求出第1条子函数谱线 L_1 。

2)将回复电压微分谱线 $L(t, 1/\tau_j, C_j)$ 减去第1条子函数谱线 L_1 ,得到剩余谱线 $F_j(*)$ 。再从当前剩余谱线 $F_j(*)$ 的末端开始,任意取3点 t_4, t_5 和 t_6 ($t_4 > t_5 > t_6$),按式(8)求出 C_{j+1}, τ_{j+1} 和 β_{j+1} ,然后再分别代入 $L(t, 1/\tau_j, C_j)$ 中,求出第2条子函数谱线 L_2 。

3)应用上述步骤依次求出第3条,第4条, ..., 直到第 $N+1$ 条子谱线。当且仅当若某一次解谱的当前剩余谱线 $F_j(*)$ 中最大峰值的绝对值小于预先设定的阈值时,则终止分解。

4)确定弛豫项数 N ,并根据已确定的拓扑结构辨识弛豫参数,同时采用吻合度法^[8,10,15]根据极化谱电压参数验证弛豫拓扑分析的准确性,如式(9)所示。

$$W = \left(1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{U_{ri}(t_p) - U_{rimax}}{U_{rimax}}\right)^2\right) \times 100\% \quad (9)$$

式中: m 为回复电压测试次数, $U_{ri}(t_p)$ 为第 i 次回复电压测试的峰值大小, U_{rimax} 为第 i 次回复电压测试建模仿真峰值大小。

3 实例验证

目前变压器油纸绝缘弛豫拓扑分析中,常采用假定法,直接凭工程上的经验随意假设弛豫拓扑机构数^[8-10]。假定法的原理是:变压器老化越严重,弛豫机构数越大。虽然假定法能快速确定拓扑结构,但容易造成后续参数辨识的吻合度不高,且具有随机性。文献[15]提出利用二次微分去极化电流法的峰谷点数判定弛豫机构数,但该方法是在偶极子松弛介质之间不会产生相互作用的条件下提出的,也仅局限于随机弛豫的弛豫拓扑建模,并没有深入分析变压器油纸绝缘系统中各种老化产物产生的多界面弛豫响应过程。将上述两种方法与本文提出的弛豫拓扑分析方法进行吻合度比较,进一步验证引入自由弛豫因子 β_i 的弛豫响应函数的准确性。

应用上述3种方法分别对两台不同绝缘状态的变压器进行拓扑结构分析,并利用式(9)进行吻合度验证,其中变压器的基本信息如表1所示。

表1 各变压器的基本信息

Table 1 The basic information of each transformer

名称	电压等级/kV	运行年限	糠醛含量/(mg · L ⁻¹)	实际绝缘状态
T ₁	220	3年	0.431	低压侧明显老化
T ₂	110	25年后退役	6.057	老化严重

根据本文2.2节拓扑分析步骤,首先采用回复电压测试仪RVM5461测试变压器T₁的回复电压曲线,根据式(7)构建回复电压时域微分谱线,如图2所示。任取末端两点[t₁, U_r(t₁)],[t₂, U_r(t₂)]和[t₃, U_r(t₃)],根据式(8)建立方程组求解第1条子函数谱线参数,同时将原始回复电压时域微分谱线扣除第1条子函数谱线数据获得剩余曲线;将剩余曲线末端任取两点[t₄, U_r(t₄)],[t₅, U_r(t₅)]和[t₆, U_r(t₆)]代入式(8)中求解第2条分支曲线参数。以此类推,直至剩余曲线的峰值小于原始曲线的5%,则停止分解。由图2可以看出,T₁具有6条子谱线,根据上述分析变压器T₁具有5条弛豫机构。而采用文献[15]提出的二次微分去极化电流法,如图3所示,图中峰谷点数为7,故忽略自由弛豫过程得到的拓扑分析结果是7条弛豫机构数。

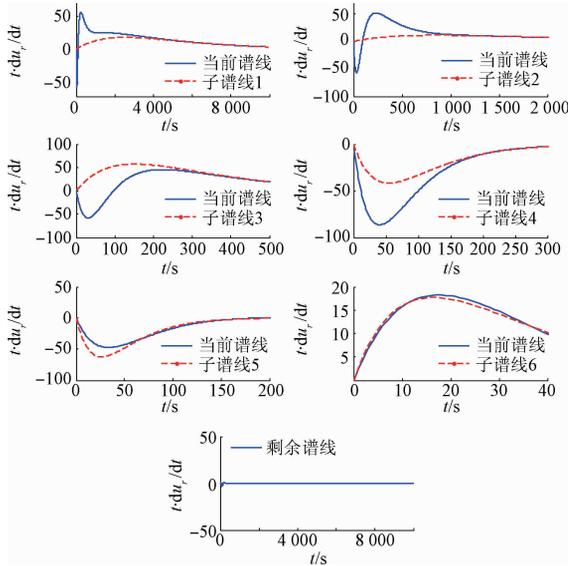


图2 T₁变压器在考虑自由弛豫情况的拓扑分析

Fig.2 Topology analysis considering free relaxation for transformer T₁

现根据各自得到的弛豫机构数对变压器T₁进行极化谱吻合度验证,结果如图4所示。由图4可以看出,弛豫机构数的变化对极化谱的前端差距不大,但在极化谱末端,6条或7条的拓扑辨识结果吻合度不高,而引入自由弛豫因子的拓扑结构分析所得的结果是5条,其极化谱计算值与变压器T₁的极化谱实测值几乎吻合,且更符合实际的变压器油纸绝缘系统的多界面弛豫机理。

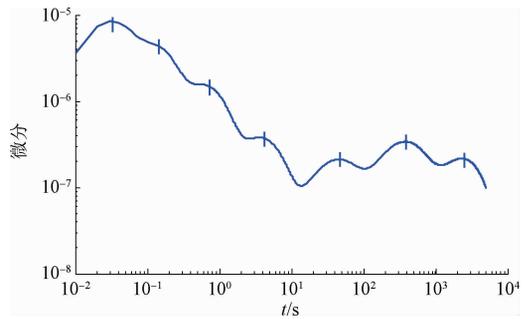


图3 T₁变压器的二次微分去极化谱线

Fig.3 The second differential polarization line of transformer T₁

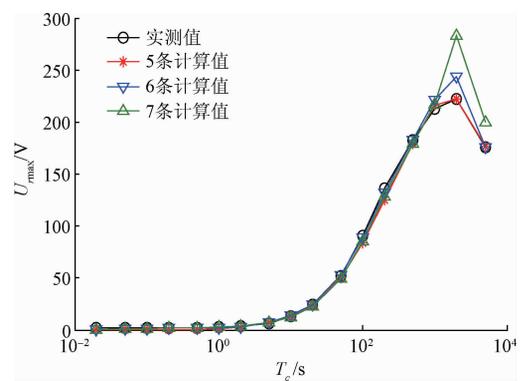


图4 T₁变压器3种方法的极化谱对比

Fig.4 Comparison of polarization spectra of three methods for transformer T₁

同理,对变压器T₂同样用上述的方法进行分析验证。T₂运用3种方法得到的各自弛豫机构数:假定法根据实际情况凭经验假定具有随机性;二次微分去极化电流如图5所示,具有6个峰谷点,确定弛豫机构数为6;本文提出的考虑自由弛豫的拓扑分析如图6所示,具有8条子谱线,即7条弛豫机构。通过回复电压极化谱吻合度验证,如图7所示。由图7可以看出,7条的吻合度最高,故考虑自由弛豫过程的拓扑分析吻合度提升明显。

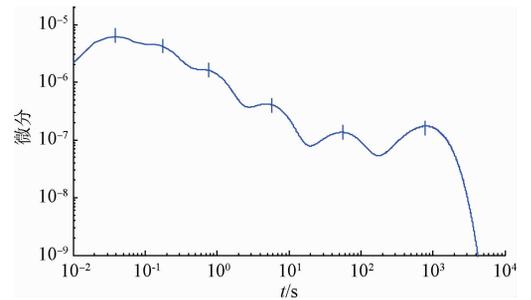


图5 T₂变压器的二次微分去极化谱线

Fig.5 T₂ transformer of the two differential to the polarization line

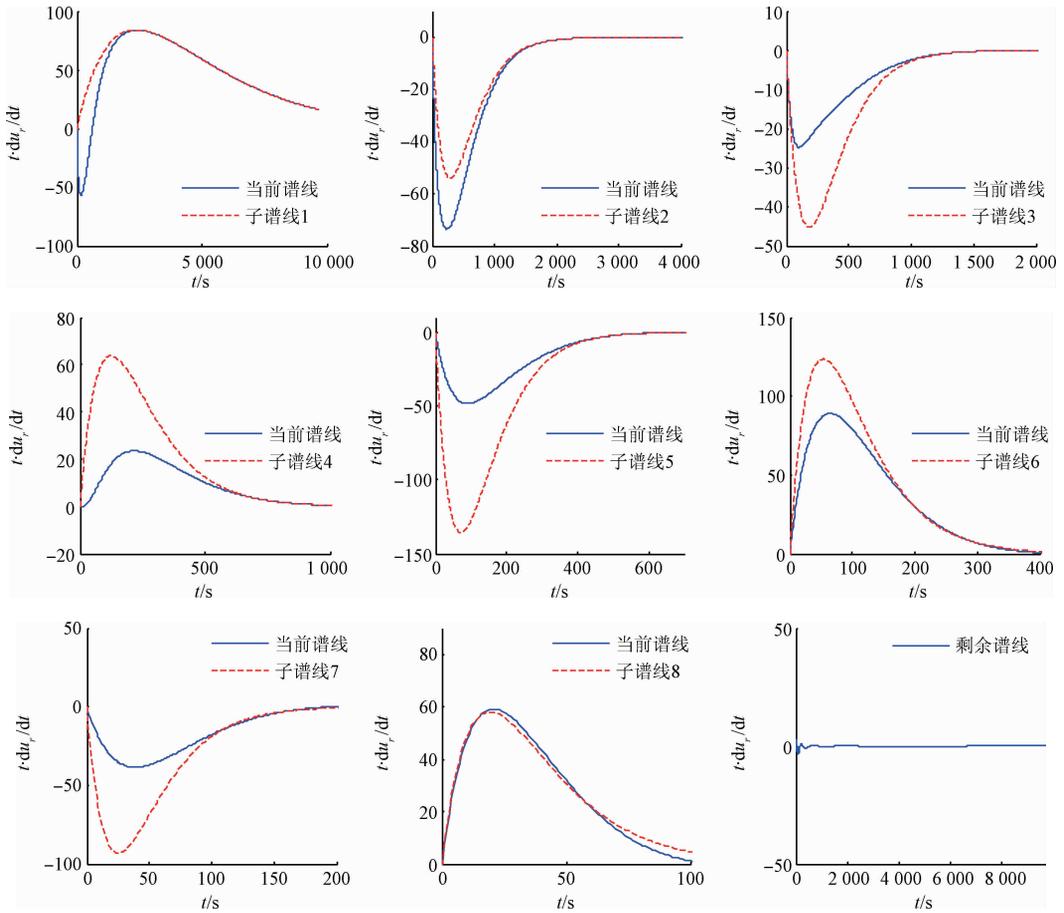


图 6 T₂ 变压器在考虑自由弛豫情况的拓扑分析

Fig. 6 T₂ transformer in the time domain differential solution of free relaxation

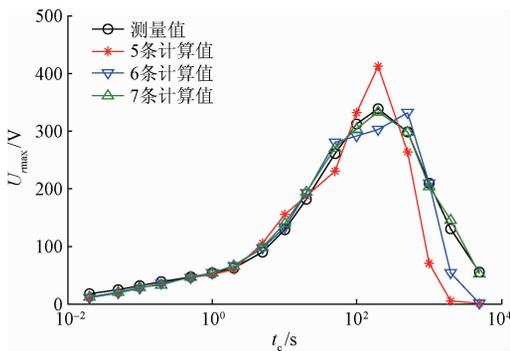


图 7 T₂ 变压器 3 种方法的极化谱对比

Fig. 7 Comparison of polarization spectra of three methods for transformer T₂

综上所述,3 种方法对变压器的油纸绝缘弛豫拓扑结构分析中,考虑自由弛豫过程的拓扑建模具有更高的吻合度,且更符合电介质极化机理。应用考虑自由弛豫过程的拓扑分析可以得到更准确的弛豫机构参数,这为

后续评估变压器的油纸绝缘状态奠定了基础。

4 油纸绝缘状态评估

进一步研究挖掘评估变压器油纸绝缘状态的时域特征量,本文采用回复电压测试仪 RVM5461 对 30 多台变压器实地测试统计。应用 2.2 节介绍的弛豫拓扑结构辨识方法,引入自由弛豫因子 β_i ,对变压器进行油纸绝缘拓扑分析。结果表明,回复电压谱线上的特征量可在一定程度上反映变压器油纸绝缘状态,且本文提出的自由弛豫因子 β_i 可用于区分诊断变压器绝缘油与绝缘纸两种介质的老化状态。由于篇幅有限,仅列出部分变压器实测数据以供参考,如表 2 所示。

4.1 弛豫机构数

根据我国 DL/T596—1996《电力设备预防性试验规程》^[3,5,8,10],应用上述方法,对变压器进行弛豫响应拓扑分析,具体结果如表 3 所示。

表2 油纸绝缘变压器分析诊断结果统计表
Table 2 The diagnostic results of oil-paper transformer

序号	绝缘 状况/糠醛	分析诊断的特征量参数								弛豫 机构 数/N	平均时间 常数 $\bar{\tau}$	诊断结果
		回复电压子谱线自由弛豫因子 β_i (时间常数由大到小排序)										
		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8			
D ₁	良好	0.792	0.803	0.811	0.819	0.826	0.884			5	857.216	绝缘状态良好
D ₂	老化较严重/ 2.43 mg/L	0.991	0.987	0.974	0.831	0.773	0.912	0.925		7	194.429	绝缘纸老化
D ₃	老化严重/ 8.3 mg/L	0.814	0.827	0.851	0.904	0.945	0.963	0.972	0.912	8	368.531	绝缘油劣化
D ₄	老化严重且受潮	0.981	0.977	0.970	0.987	0.893	0.750	0.776	0.611	8	113.797	绝缘纸老化
D ₅	良好	0.812	0.773	0.897	0.901					4	932.682	绝缘状态良好
D ₆	良好	0.729	0.805	0.892	0.910	0.927				5	618.437	绝缘状态良好
D ₇	老化较严重/ 1.43 mg/L	0.812	0.719	0.774	0.972	0.951	0.973			6	451.379	绝缘油劣化
D ₈	高、低压侧老化严重	0.697	0.745	0.810	0.967	0.971	0.974	0.979		7	211.438	绝缘油劣化
D ₉	低压绕组老化	0.812	0.817	0.839	0.970	0.977	0.980			6	412.741	绝缘油劣化
⋮		⋮			⋮			⋮				⋮
D ₁₅	低压侧老化/3.73 mg/L	0.971	0.978	0.980	0.989	0.972	0.891	0.883	0.912	8	449.185	绝缘纸老化
D ₁₆	良好	0.831	0.796	0.892	0.912	0.928				5	703.412	绝缘状态良好
D ₁₇	高、低压侧严重老化	0.693	0.716	0.783	0.849	0.961	0.974	0.979	0.980	8	440.932	绝缘油劣化
D ₁₈	低压侧老化较严重	0.977	0.979	0.983	0.986	0.774	0.893			6	218.433	绝缘纸老化
D ₁₉	老化严重/2.57 mg/L	0.718	0.869	0.892	0.911	0.958	0.977	0.979		7	330.657	绝缘油劣化
D ₂₀	良好	0.813	0.786	0.830	0.908	0.923	0.921			6	862.593	绝缘状态良好
⋮		⋮			⋮			⋮				⋮
D ₂₆	老化严重/3.61 mg/L	0.979	0.981	0.989	0.691	0.788	0.927	0.930		7	382.917	绝缘纸老化
D ₂₇	老化较严重	0.975	0.978	0.980	0.893	0.914	0.929	0.930		7	248.943	绝缘纸老化
D ₂₈	良好	0.739	0.886	0.919	0.927					4	902.539	绝缘油劣化
D ₂₉	低压绕组老化严重	0.812	0.817	0.819	0.955	0.973	0.976	0.979		7	274.968	绝缘油劣化
D ₃₀	良好/0.037 mg/L	0.699	0.736	0.802	0.853	0.897				5	810.476	绝缘状态良好
D ₃₁	良好	0.731	0.795	0.804	0.862	0.853	0.864			6	870.919	绝缘状态良好
⋮		⋮			⋮			⋮				⋮

表3 不同油纸绝缘状态的弛豫机构数
Table 3 The number of relaxation mechanisms in different oil-paper insulation states

变压器 绝缘状态	糠醛含量/ (mg · L ⁻¹)	变压器台数	弛豫机构数
绝缘良好	≤0.5	15	5
老化较严重	0.5 ~ 1.0	8	6
老化严重	≥4	11	7

根据统计结果可以看出,变压器油纸绝缘状态与弛豫机构数具有一定的关系。弛豫机构数越大,变压器的油纸绝缘状态越差。这是因为油纸绝缘老化越严重,老化产物越多且复杂,等效电路的弛豫机构一定程度上表征几种相似介质的弛豫过程,故可用弛豫机构数来初步诊断变压器油纸绝缘状态。

4.2 平均时间常数

不同油纸绝缘状态的变压器具有不同的弛豫机构数,无法直接利用单个弛豫时间常数 τ_i 评估绝缘状态。

故本文提出对时间常数进行归一化处理,如式(10)所示。对所有弛豫时间常数 τ_i 取均值化算子,将此特征量定义为平均时间常数 $\bar{\tau}$ 。

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right) \quad (10)$$

式中: n 为弛豫机构数。平均时间常数 $\bar{\tau}$ 综合了各个弛豫机构的弛豫响应信息。为了研究新特征量平均时间常数 $\bar{\tau}$ 与变压器油纸绝缘状态的量化关系,有必要进一步分析平均时间常数 $\bar{\tau}$ 与油中糠醛含量的相关性。目前国内外学者对变压器油中糠醛含量检测应用于评估油纸绝缘状态已有一定研究。若对待诊变压器抽油检测分析,变压器油中糠醛含量越大,则变压器油纸绝缘老化越严重,但直接采用糠醛含量检测诊断变压器油纸绝缘状态有一定缺陷^[12,15],如检测过程繁琐、抽油处理易破坏变压器绝缘系统、外界因素易影响检测结果等。油中糠醛含量的无损检测是现在变压油纸绝缘研究的一个热点问题。

对30多台测试变压器进行统计分析。平均时间常数 $\bar{\tau}$ 与糠醛含量关系如图8所示,呈负相关。故平均时间常数 $\bar{\tau}$ 越大,油纸绝缘状态越好。通过对不同绝缘状态变压器各个绕组的测试和数据分析可知,应用平均时间常数 $\bar{\tau}$ 可以较为准确地对变压器油纸绝缘老化状态进行评估。从表2可以看出,若油纸绝缘变压器绝缘状态良好,则平均时间常数 $\bar{\tau}$ 的数值在[618.437, 932.682];反之,若油纸绝缘老化严重,则平均时间常数 $\bar{\tau}$ 的数值在[113.797, 451.379]。这些数据可作为今后诊断变压器油纸绝缘状况的参考依据。

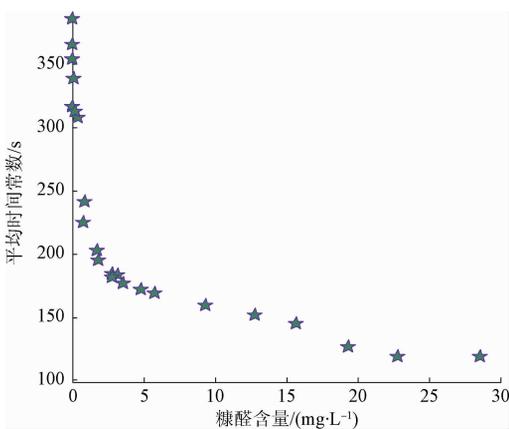


图8 平均时间常数与糠醛含量关系

Fig. 8 Relationship between the average time constant and furfural content

4.3 自由弛豫因子 β_i

已有研究表明^[8,10,16],大时间常数支路为代表绝缘纸的拓扑机构;中时间常数支路为代表油纸界面的拓扑

机构;小时间常数支路为代表绝缘油的拓扑机构。在初步评估变压器油纸绝缘状态的基础上,为了进一步研究绝缘油和绝缘纸的绝缘状态,本文通过30多台不同绝缘状态的变压器测试数据进行分析。结果表明,自由弛豫因子 β_i 在绝缘油劣化和绝缘纸老化的两种状态中具有不同的数值范围,如表4所示。

表4 不同绝缘状态下的自由弛豫因子
Table 4 Free relaxation factor in different insulation states

变压器绝缘状态	台数	自由弛豫因子
绝缘良好	11	油 $\in[0.61, 0.93]$, 纸 $\in[0.5, 0.83]$
绝缘油劣化	8	油 $\in[0.95, 0.98]$
绝缘纸老化	12	纸 $\in[0.97, 0.99]$

现以表2中变压器实测数据为例进行具体分析,在表2中 D_1 和 D_7 是同一台变压器,型号为SFP9-24000/220,运行年限为8年。 D_7 表示变压器检修前的状态,糠醛检测含量为1.43 mg/L,处于绝缘老化较严重的状态,弛豫拓扑结构为6条支路。经过换油检修后,糠醛检测含量降低为0.03 mg/L,重新应用本文提出的算法辨识弛豫拓扑结构,结果仍然为6条支路。由此可见,变压器经换油检修后,由 D_7 状态转变为 D_1 ,弛豫机构数没有发生改变,此时由弛豫机构数来诊断变压器油纸绝缘状态不可行。

通过各弛豫机构自由弛豫因子 β_i 的范围分析发现:换油前表征绝缘油弛豫支路有3条,其自由弛豫因子分别为0.972、0.951和0.973,自由弛豫因子较接近于1;换油后表征绝缘油的弛豫支路减少1条,其自由弛豫因子 β_i 分别为0.826和0.884,相比换油前的自由弛豫因子,换油后明显减小。根据电介质弛豫理论分析可知,换油后老化产物减小,去极化速度减缓,自由弛豫因子 β_i 随之减小。由此可见,换油后绝缘油的状态优于换油前,这与实际结果相吻合。同理,表2中的其他检测实例也可直接说明自由弛豫因子 β_i 可用于绝缘纸的老化状况分析。

5 结 论

提出一种考虑自由弛豫过程的变压器油纸绝缘拓扑分析的理论及方法,并通过实测数据验证该方法的准确性。研究成果在工程中具有一定的应用价值。同时,本文进一步挖掘变压器油与纸绝缘状态评估的新特征量。

1) 通过30多台变压器实测数据验证了弛豫机构数

与油纸绝缘老化的关系:弛豫机构数越大,油纸绝缘老化越严重。

2)本文提出一种诊断变压器油纸绝缘状态的新特征量平均时间常数 $\bar{\tau}$,其与油中糠醛含量呈负相关。若油纸绝缘变压器绝缘状态良好其平均时间常数 $\bar{\tau}$ 的值在[618.437,932.682];反之,其平均时间常数 $\bar{\tau}$ 的值在[113.797,451.379]。这些数据可作为今后初步诊断变压器油纸绝缘状况的参考依据。

3)通过自由弛豫因子 β_i 数值范围的分析与计算,可以评估变压器绝缘油与纸的绝缘状态,若自由弛豫因子 β_i 越大,相应的绝缘状态越差;反之,则绝缘状态越好。

参考文献

- [1] 陈伟根,杜杰,凌云,等.基于能量-小波矩特征分析的油纸绝缘气隙放电过程划分术[J].仪器仪表学报,2013,35(5):1062-1069.
CHEN W G, DU J, LING Y, et al. Air-gap discharge process partition in oil-paper insulation based on energy-wavelet moment feature analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 35(5): 1062-1069.
- [2] 谢松,邹阳,蔡金锭.基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估[J].仪器仪表学报,2017,38(1):190-197.
XIE S, ZHOU Y, CAI J D. Assessment of transformer oil-paper insulation status with fuzzy rough set[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 190-197.
- [3] 陈汉城,蔡金锭.基于多时域特征参量的变压器油纸绝缘状态综合评估[J].电力自动化设备,2017,37(7):184-190.
CHEN H CH, GAI J D. Synthetic insulation state evaluation based on multiple time-domain characteristic parameters for transformer oil-paper[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 184-190.
- [4] 严欣,蔡金锭.油纸绝缘设备微水量的定性评估方法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(10):1478-1484.
YAN X, CAI J D. Study on the micro water content of oil-paper insulation transformer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1478-1484.
- [5] 林智勇,蔡金锭.基于回复电压特征量的油纸绝缘老化诊断[J].电子测量与仪器学报,2015,29(11):1669-1676.
LIN ZH Y, CAI J D. Aging diagnosis of oil-paper insulation based on the return voltage characteristics[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1669-1676.
- [6] WANG C, YU H Y, WU D Y. Volume fraction measurement of oil-water two-phase flow using a coaxial conductivity sensor[J]. Instrumentation, 2014, 1(1): 49-58.
- [7] 祝顺才,蔡金锭.基于模糊-灰色聚类的油纸绝缘状态综合诊断[J].仪器仪表学报,2017,38(3):718-725.
ZHU SH C, CAI J D. Comprehensive diagnosis of oil-paper insulation status based on fuzzy gray clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 718-725.
- [8] 夏飞,罗志疆,张浩,等.混合神经网络在变压器故障诊断中的应用[J].电子测量与仪器学报,2017,31(1):118-124.
XIA F, LUO ZH J, ZHANG H, et al. Application of mixed neural network in transformer fault diagnosis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 118-124.
- [9] 马星河,马利,周涛,等.矿用电缆绝缘监测PD信号降噪新方法的研究[J].电子测量技术,2016,39(1):123-127.
MA X H, MA L, ZHOU T, et al. Study on new method of on-line monitoring of PD signal noise insulation cable for mine[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1): 123-127.
- [10] 江修波,张涛,黄彦婕.变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J].电力自动化设备,2011,31(2):31-35.
JIANG X B, ZHANG T, HUANG Y J. Simulation of transformer insulation polarization spectrum[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 31-35.
- [11] 孙琦,朱孔军,周岸卿.基于FPGA的压电变压器驱动控制及无线监控电路设计[J].国外电子测量技术,2017,36(4):81-86.
SUN Q, ZHU K J, ZHOU AN Q. Design of a piezoelectric transformer controller and a wireless monitoring circuit based on FPGA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(4): 81-86.
- [12] CHEN D, YANG Y. Attribute reduction for heterogeneous data based on the combination of classical and fuzzy rough set models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(5): 1325-1334.
- [13] 蔡金锭,陈汉城.基于陷阱密度谱特征量的油纸绝缘变压器老化诊断[J].高电压技术,2017,43(8):2574-2581.

- CAI J D, CHEN H CH. Aging diagnosis of oil-paper insulation based on trap density spectrum [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2574-2581.
- [14] 李景德, 曹万强, 李向前, 等. 时域介电谱方法及其应用[J]. 物理学报, 1996, 45(7): 1225-1231.
LI J D, CAO W X, LI X Q, et al. Time domain dielectric spectroscopy method and its application [J]. Acta Physica Sinica, 1996, 45(7): 1225-1231.
- [15] 蔡金锭, 严欣, 蔡嘉. 去极化电流微分法在求解变压器极化等效电路参数中的应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3172-3177.
CAI J D, YAN X, CAI J. Application of differential depolarization current method for solving equivalent polarization circuit parameters of transformer [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3172-3177.
- [16] 廖瑞金, 刘骁, 刘捷丰, 等. 现场变压器油纸绝缘时频域介电特征量提取及状态评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 94-100.
LIAO R J, LIU X, LIU J F, et al. Extraction of time and frequency domain dielectric characteristics and condition assessment for field transformer oil-paper insulation [J].

Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 94-100.

作者简介



陈汉城, 2015年于华侨大学获得学士学位, 现为福州大学硕士研究生, 主要研究方向为电气设备绝缘老化诊断。

E-mail: 530795611@qq.com

Chen Hancheng received his B. Sc. degree from Huaqiao University in 2015. Now he is a graduate student in Fuzhou University. His main research interest is insulation aging diagnosis of electrical equipment.



蔡金锭, 1989年于湖南大学获得硕士学位, 2001年于西安交通大学获得博士学位, 现为福州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电力系统故障诊断研究。

E-mail: cjd@fzu.edu.cn

Cai Jinding received his M. Sc. degree from Hunan University in 1989, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2001. Now he is a professor and doctoral supervisor in Fuzhou University. His main research interest is fault diagnosis of power system.